

Gravimetric analysis and calculation of the strength of a liquid in the La Malinche volcano, Puebla-Tlaxcala, Mexico

Rogelio Ramos-Aguilar^a, Patricia Máximo-Romero^a, Víctor Galindo-López^a, Máximo Ávila-Cruz^a, Gabriela Yáñez-Pérez^a, Rubén Márquez-Máximo^a, Daniel Hernández-Andrade^a & Victoriano Covarrubias-Salvatori^b.

^a Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, San Manuel, Puebla, México. rogelio.ramos@correo.buap.mx, patricia.maximo@correo.buap.mx, victor.galindo@correo.buap.mx, maximo.avila@correo.buap.mx, gabriela.yanez@correo.buap.mx, ruben.marquezm@correo.buap.mx, daniel.hernandez@alumno.buap.mx

^b Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, Huexotitla, Puebla, México. victoriano.covarrubias@puebla.gob.mx

Received: November 30th, 2020. Received in revised form: February 27th, 2021. Accepted: March 01st, 2021

Abstract

The present work seeks to contribute with a gravimetric analysis of La Malinche volcaniuytre, through as references 39 points defined within the protected natural area of its National Park, calculating free air and Bouguer anomalies, as well as the force of a liquid in an intermittent current, with the objective of determining the behavior of water and gravity with respect to the pronounced slope in the southwest of the building, through the EIGEN-6C4 gravimetric model. The results show Bouguer's anomalies with negative values and positive values for the free air anomalies, showing a behavior inversely proportional between the height of the point and the gravity. With respect to the analysis of the force of water, a behavior inversely proportional to the slope is shown, with an average value of 8919.062093 N/m³.

Keywords: Malinche; gravity; Bouguer's anomaly; free air anomaly; water force.

Análisis gravimétrico y cálculo de la fuerza de un líquido en el volcán La Malinche, Puebla-Tlaxcala, México

Resumen

El presente trabajo busca contribuir con un análisis gravimétrico del volcán La Malinche, tomando como referencias 39 puntos definidos dentro del área natural protegida de su Parque Nacional, calculando anomalías de aire libre y Bouguer, así como la fuerza de un líquido en una corriente intermitente, con el objetivo de determinar el comportamiento del agua y la gravedad respecto de la pendiente pronunciada en el suroeste del edificio, a través del modelo gravimétrico EIGEN-6C4. Los resultados muestran anomalías de Bouguer con valores negativos y valores positivos para las anomalías de aire libre, mostrando un comportamiento inversamente proporcional entre la altura del punto y la gravedad. Respecto al análisis de la fuerza del agua se muestra un comportamiento inversamente proporcional a la pendiente, con valor promedio de 8919.062093 N/m³.

Palabras clave: Malinche; gravedad; anomalía de Bouguer; anomalía de aire libre; fuerza del agua.

1. Introducción

El parque nacional Malinche queda comprendido en los territorios de los estados de Tlaxcala y Puebla como se muestra en la Fig. 1. De acuerdo con [6], el estado de Tlaxcala, ejerce su jurisdicción en 12 de sus municipios: Acuamanala de Miguel Hidalgo, Chiautempan, Contla de Juan Cuamatzi, Huamantla, Ixtenco, Mazatecochco de José Ma. Morelos, San Francisco Tetlanohcan, San José Teacalco, San Pablo del Monte, Santa Cruz Tlaxcala, Teolocholco,

Zitlaltepec de Trinidad Sánchez S. y el estado de Puebla en 4 municipios: Acajete, Amozoc de Mota, Puebla y Tepatlaxco de Hidalgo.

El volcán Matlalcueye es un estratovolcán andesítico neógeno-cuaternario en fase de reposo que se encuentra en la zona central oriente de México como parte del Eje Volcánico Transversal Mexicano (EVTM) [11]. La Malinche, es el nombre oficial, pero por cuestiones históricas se ha optado por Matlalcueye. El significado proviene de la lengua náhuatl: matlactli, color azul o verde oscuro, y cueitl, naguas o faldas es decir "La que tiene falda azul".

How to cite: Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Galindo-López, V., Ávila-Cruz, M., Yáñez-Pérez, G., Márquez-Máximo, R., Hernández-Andrade, D and Covarrubias-Salvatori, V. Análisis gravimétrico y cálculo de la fuerza de un líquido en el volcán Malinche, Puebla-Tlaxcala, México. Boletín de Ciencias de la Tierra. Territorios del Futuro, 49, pp. 9-14, Agosto 2020 - Enero 2021

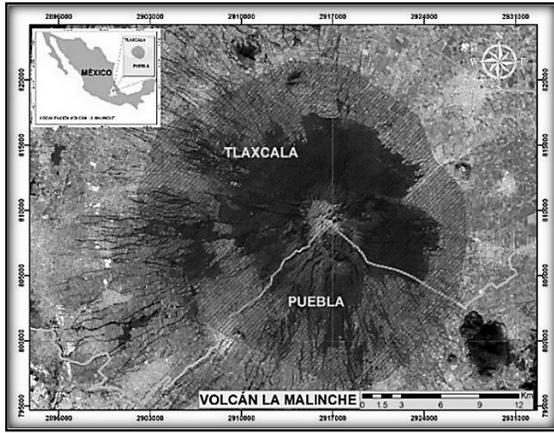


Figura 1. Localización geográfica del Volcán la Malinche. Fuente: Los autores.

La actividad volcánica empezó hace unos 25 millones de años, durante el Oligoceno. La estructura actual data del período Cuaternario, hace aproximadamente 45 mil años. Ha tenido varias erupciones que la ha hecho elevarse y colapsar sucesivamente. Posee lavas dacíticas y andesíticas, por lo que es un volcán explosivo que ha tenido erupciones vulcanianas a ultraplínicas.

De acuerdo con [11], su cima a 4430 msnm, corresponde a la séptima cumbre más alta de la nación, La Matlalcueye, por ser un volcán, tiene forma de cono con extensas laderas en las que se levantan algunas cumbres menores, como los cerros Xaltonalli, Tlachichihuatzli (La Tetilla) y Cuatlapanga.

Este volcán se considera activo en estado de reposo, lo que quiere decir que han pasado menos de 10,000 años desde su última erupción; algunos autores consideran que no presenta ningún tipo de actividad superficial que pueda asociarse a presencia de magma dentro del edificio volcánico [3,11], sin embargo, [1] identificaron entre el 1 de septiembre de 2012 y el 1 de mayo de 2013, un total de 11 sismos volcano-tectónicos de diferentes tipos. Algunos de los sismos de baja frecuencia se relacionan con la interacción fluido-roca y, por otra parte, se tienen algunos sismos de tipo tornillo, cuya amplitud máxima se tiene al comienzo del sismo y disminuye gradualmente, los cuales suelen ser precursores a actividad volcánica explosiva, por lo que sísmicamente, el volcán La Malinche está activo. Sin embargo, al considerarse en estado de reposo, diversas localidades se han asentado en los alrededores del volcán desde hace algunos siglos y han crecido considerablemente durante las últimas décadas, principalmente por la fertilidad de los suelos y por el potencial turístico que ofrece, no obstante, esta concentración poblacional alrededor de La Malinche, junto con las grandes dimensiones del volcán, lo convierten en uno de los volcanes con mayor riesgo en el país [5]. En este sentido el objetivo del trabajo es contribuir con datos y análisis gravimétricos del volcán la Malinche, así como contribuir con datos que determinan el gasto y la fuerza del agua en la corriente intermitente de mayor pendiente, esto a través del modelo gravimétrico EIGEN-6C4, y modelos matemáticos para determinar la aceleración de la gravedad normal y anomalías de aire libre y Bouguer, con la finalidad de modelar dichas anomalías y mostrar la relación de la

fuerza del agua sobre una corriente intermitente respecto su pendiente y la gravedad local.

2 Marco teórico

El conocimiento de campo anómalo de gravedad terrestre, de acuerdo con [8], se considera de vital importancia no solo para la geodesia, sino también para otras áreas de las geociencias, dado que este, permite ubicar al geoide respecto del elipsoide, así como, la determinación de la desviación de la vertical. A continuación, se analiza la diferencia entre el campo real y el campo normal de gravedad terrestre, siendo el potencial anómalo o potencial perturbador (T) la diferencia (ec. 1), entre el potencial de gravedad real (W) y el potencial de gravedad normal (U).

$$T(x, y, z) = W(x, y, z) - U(x, y, z) \quad (1)$$

Considerando la Fig. 2, el vector de la gravedad real (\vec{g}_p) en el punto P y el vector de la gravedad normal ($\vec{\gamma}_Q$) en el punto Q, entonces, la diferencia entre ambos vectores de gravedad se considera la llamada Anomalía de gravedad (Δg) (ec. 2).

$$(\Delta g) = \vec{g}_p - \vec{\gamma}_Q \quad (2)$$

La gravedad normal se calcula tomando como referencia el elipsoide de revolución como una aproximación de la gravedad, siendo para el GRS80, la fórmula de gravedad normal internacional adoptada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) (ec. 3). Donde φ es la latitud y γ la gravedad normal dada en m/s² [8].

$$\gamma = 9.78032(1 + 0.0053025\text{sen}^2\varphi - 0.0000058\text{sen}^22\varphi) \quad (3)$$

De acuerdo con lo que menciona [8,10], la gravedad varía principalmente en el sentido vertical, por lo que es necesario llevar el valor medido sobre la superficie terrestre al valor correspondiente en el geoide, siendo en ausencia de masas, considerada la llamada reducción por aire libre, que para efectos prácticos es utilizada la ec. (4), donde H es la altura y F la reducción por aire libre en mgal.

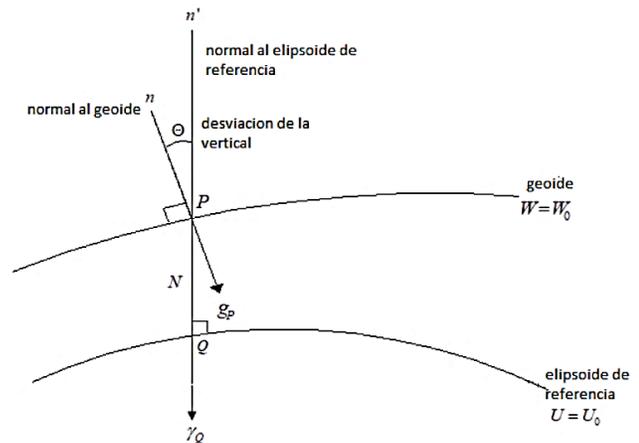


Figura 2. Vectores de gravedad normal y real. Fuente: [10].

$$F = 0.3086 * H \quad (4)$$

Para obtener la correspondiente anomalía de aire libre (Δg_{AL}), de acuerdo con [2], se utiliza el valor de la gravedad observada (g_{obs}) más la respectiva reducción de aire libre (F) menos la gravedad normal (γ), expresada en la ec. (5).

$$\Delta g_{AL} = g_{obs} + F - \gamma \quad (5)$$

Para remover el efecto de las masas topográficas en la gravedad, se considera la distribución en una placa de altura constante, denominada Placa de Bouguer [2,8], siendo esta una placa horizontal infinita y con densidad constante para este análisis ($\rho = 2.67 \text{ gr/cm}^3$), representando a la reducción de Bouguer a través de la ec. (6).

$$A_B = 0.1119 * H \quad (6)$$

La correspondiente anomalía de gravedad de Bouguer es representativa de cambios de densidad a nivel cortical y de cambios de grosor en la corteza terrestre, siendo generalmente negativa, dada por la ec. (7).

$$\Delta g_B = g_{obs} - \gamma - F + A_B \quad (7)$$

2.1 Modelo EIGEN-6C4

El Centro Internacional de Modelos Globales Terrestres (ICGEM, por sus siglas en inglés), alojado en el Centro de Investigación Alemán para las Geociencias (GFZ, por sus siglas en alemán), coordinado por el Servicio Internacional de Campo de Gravedad (IGFS) de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), tiene por objetivo proporcionar información respecto a modelos de gravedad terrestre [9]. Tal es el caso del modelo europeo de gravedad mejorada de la Tierra mediante nuevas técnicas, en su cuarta versión EIGEN-6C4 [6], el cual es un modelo combinado de campo de gravedad de LAGEOS, GRACE y la misión GOCE, disponible en: <http://icgem.gfz-potsdam.de/> el cual es una de las mejores aproximaciones del campo de gravedad real, dada la combinación de misiones satelitales, mediciones terrestres y medición altimétrica derivadas del campo de gravedad [9, 3].

2.2 Fuerza del agua

La fuerza del agua es la cantidad de empuje que ejerce este líquido en dirección de la pendiente, para su cálculo el modelo matemático $F_1 = d * \cos m * gl$ ha sido utilizado para obtener los resultados [14], donde d es la densidad del agua (1000 Kg/m^3), m es la pendiente entre dos puntos, y gl la gravedad local [12] la cual puede calcularse mediante la corrección de aire libre y la aceleración de la gravedad normal, siendo $gl = \gamma - F$.

3. Materiales y métodos

Para el análisis gravimétrico se han determinado 39 puntos gravimétricos sobre la Malinche como se muestra en la Fig. 3, teniendo de ellos su latitud y longitud y altura elipsoidal, con la cual se ha transformado a altura ortométrica con software libre de INEGI (<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/alturasgeoidales/>) de este modo se han aplicado los modelos matemáticos

propuestos, para calcular la aceleración de la gravedad normal, así mismo se ha hecho uso del modelo EIGEN-6C4 para obtener la gravedad observada sobre los puntos determinados (los valores que se utilizan están basados en la cuarta versión del modelo EIGEN-6C4, la versión más actual del modelo, por lo que en versiones posteriores los valores pueden presentar variación alguna), posteriormente se han calculado las reducciones de aire libre y Bouguer, para calcular sus respectivas gravedades y así las anomalías. Por practicidad se programó una hoja de cálculo, utilizando la base de datos del modelo IEGEN-6C4 para el cálculo automático de cada punto.

Para el cálculo de la fuerza del agua, se realizó en 13 puntos adicionales, en una corriente intermitente de la Malinche, correspondiente a la subcuencas RH18Ab, como se muestra en la Fig. 4. Para lo cual se ha calculado la pendiente y gravedad local.

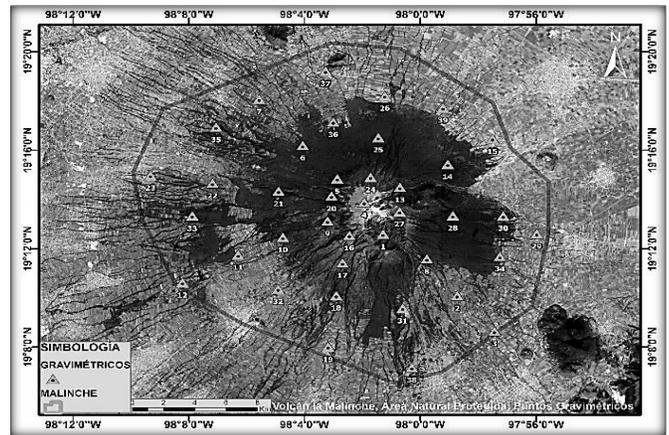


Figura 3. Localización de puntos gravimétricos sobre el volcán la Malinche. Fuente: Los autores.

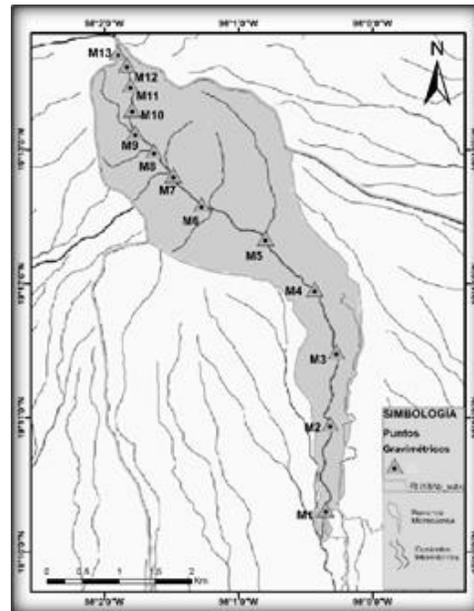
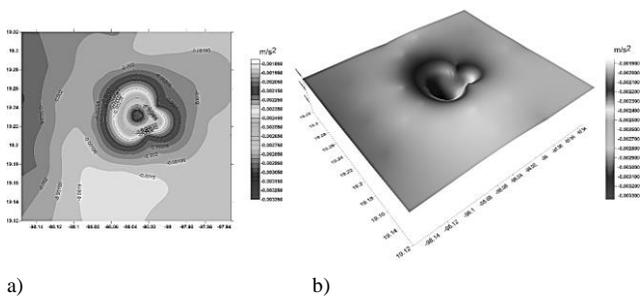


Figura 4. Puntos gravimétricos sobre corriente intermitente, de la microcuenca perteneciente a la subcuenca RH18Ab_sub. Fuente: Los autores.

Tabla 1.
Resultados del cálculo de gravedad normal y anomalías de aire libre y Bouguer

Punto	H	Latitud			Latitud		Gravedad Eigen-6C4 m/s ²	Gravedad Normal m/s ²	Anomalia de Aire Libre m/s ²	Anomalia de Bouguer m/s ²
		G	M	S	Decimal	Radianes				
1	4412	19	13	53.18	19.23143889	0.335651929	9.773847635	9.785924585	0.001538482	-0.003398546
2	3770	19	14	54.73	19.24853611	0.335950331	9.775888540	9.785934182	0.001588578	-0.002630052
3	3382	19	14	29.84	19.24162222	0.335829661	9.777114154	9.785930300	0.001620706	-0.002163752
4	3796	19	13	30.87	19.22524167	0.335543767	9.775789783	9.785921109	0.001583130	-0.002664594
5	3385	19	12	35.97	19.20999167	0.335277604	9.777124376	9.785912558	0.001657928	-0.002129887
6	3627	19	12	32.9	19.20913889	0.33526272	9.776347756	9.785912080	0.001628598	-0.002430015
7	3584	19	13	7.74	19.21881667	0.335431629	9.776475854	9.785917506	0.001618572	-0.002391924
8	3645	19	14	8.47	19.23568611	0.335726057	9.776291682	9.785926969	0.001613184	-0.002465571
9	3597	19	14	51.09	19.247525	0.335932684	9.776431221	9.785933614	0.001597949	-0.002427094
10	3005	19	17	9.32	19.28592222	0.336602842	9.778087125	9.785955191	0.001405364	-0.001957231
11	3203	19	16	31.39	19.27538611	0.336418952	9.777565499	9.785949267	0.001500690	-0.002083467
12	3077	19	15	26.45	19.25734722	0.336104114	9.777851042	9.785939130	0.001407534	-0.002035629
13	3126	19	13	20.99	19.22249722	0.335495867	9.777722334	9.785919570	0.001449600	-0.002048394
14	3126	19	11	35.46	19.19318333	0.334984243	9.777749683	9.785903140	0.001493379	-0.002004615
15	3255	19	11	25.82	19.19050556	0.334937507	9.777446266	9.785901640	0.001589556	-0.002052789
16	3088	19	12	28.33	19.20786944	0.335240564	9.777861764	9.785911368	0.001479964	-0.001975508
17	3064	19	14	20.48	19.23902222	0.335784283	9.777941218	9.785928841	0.001467882	-0.001960734
18	3077	19	16	12.1	19.27002778	0.336325432	9.777883132	9.785946255	0.001432499	-0.002010664
19	2859	19	18	12.85	19.30356944	0.336910844	9.778422813	9.785965120	0.001280567	-0.001918654
20	2834	19	17	43.72	19.29547778	0.336769618	9.778432260	9.785960566	0.001217418	-0.001953828
21	2781	19	16	28.29	19.274525	0.336403923	9.778492634	9.785948783	0.001126018	-0.001985921
22	2799	19	13	20.6	19.22238889	0.335493976	9.778475980	9.785919509	0.001194185	-0.001937896
23	2681	19	12	36.8	19.21022222	0.335281628	9.778687444	9.785912687	0.001048323	-0.001951716
24	2786	19	11	41.45	19.19484722	0.335013283	9.778495671	9.785904072	0.001189196	-0.001928338
25	2830	19	10	5.75	19.16826389	0.334549317	9.778399818	9.785889189	0.001244009	-0.001922761
26	2606	19	8	39.27	19.14424167	0.33413005	9.778835464	9.785875756	0.001001824	-0.001914290
27	2884	19	9	35.4	19.15983333	0.334402176	9.778323287	9.785884473	0.001338838	-0.001888358
28	2593	19	7	10.83	19.119675	0.333701281	9.778824551	9.785862033	0.000964517	-0.001937050
29	2961	19	10	6.29	19.16841389	0.334551935	9.778191829	9.785889273	0.001440202	-0.001873157
30	2652	19	8	1.19	19.13366389	0.333945433	9.778796724	9.785869845	0.001110951	-0.001856637
31	2831	19	10	21.93	19.17275833	0.33462776	9.778432963	9.785891704	0.001277725	-0.001890164
32	2762	19	11	45.17	19.19588056	0.335031319	9.778552359	9.785904650	0.001171240	-0.001919438
33	2507	19	10	37.89	19.17719167	0.334705136	9.778914641	9.785894185	0.000757058	-0.002048275
34	2643	19	13	20.36	19.22232222	0.335492813	9.778673645	9.785919471	0.000910472	-0.002047045
35	2701	19	14	39.8	19.24438889	0.335877949	9.778620235	9.785931853	0.001023667	-0.001998752
36	2470	19	14	58.88	19.24968889	0.335970451	9.778968818	9.785934829	0.000656409	-0.002107521
37	2619	19	16	56.65	19.28240278	0.336541416	9.778761651	9.785953212	0.000890673	-0.002039988
38	2680	19	18	4.82	19.30133889	0.336871914	9.778697639	9.785963865	0.001004254	-0.001994666
39	2770	19	19	13.19	19.32033056	0.337203381	9.778513611	9.785974557	0.001087274	-0.002012356

Fuente: Los autores



a) b)
Figura 5. Modelación de anomalía de Bouguer donde el valor promedio es de -0.002101469 m/s², el máximo de -0.001856637 m/s² y el mínimo de -0.003398546 m/s². a) Vista en planta del modelo de isolíneas de anomalías de Bouguer, b) Modelo 3D de las anomalías de Bouguer.
Fuente: Los autores.

4. Resultados

Aplicando los modelos matemáticos, anteriormente mencionados, se han obtenido las anomalías de aire libre y

Bouguer sobre el volcán la Malinche, como se muestra en la Tabla 1.

La anomalía de aire libre, muestra variación en el sentido vertical con un promedio de los 39 puntos de 0.001297652 m/s². La anomalía de Bouguer, se presenta negativa en todos los puntos en promedio de -0.002101469 m/s² dichas anomalías han sido modeladas en Surfer, como se muestra en la Fig. 5 y 6.

De acuerdo al modelo generado, concuerda que, en determinadas zonas montañosas, los valores de la anomalía de Bouguer son negativos por deficiencia de masa dada una compensación isostática.

El modelo de la anomalía de aire libre (Fig. 6), muestra la correspondiente reducción al geoide, siendo dicha anomalía, directamente proporcional a la altura es decir conforme se incrementa la altura también lo hacen las anomalías de aire libre.

En relación a la Fig. 4 (la cual muestra los puntos que se han utilizado para calcular la fuerza del agua sobre una corriente intermitente), han sido calculados como se muestra en la Tabla 2, de acuerdo al modelo matemático descrito en el marco teórico.

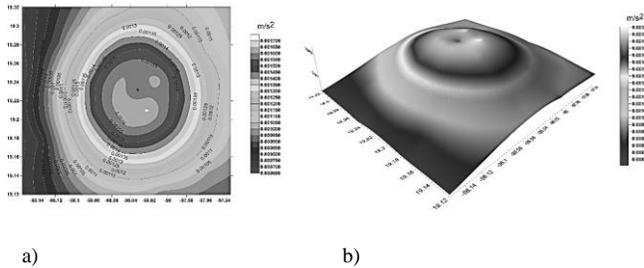


Figura 6. Modelación de anomalía de aire libre, donde el valor promedio es de 0.001297652 m/s², el valor mínimo de 0.000656409 m/s² y máximo de 0.001657928 m/s². a) Vista en planta del modelo de isolíneas de anomalías de aire libre, b) Modelo 3D de las anomalías de aire libre.
Fuente: Los autores.

Tabla 2. Resultados del cálculo de la fuerza del agua sobre corriente intermitente al suroeste del volcán

Punto	Pendiente (m)	Cos (m)	Densidad del agua (Kg/m ³)	Gravedad local (m/s ²)	Fuerza del agua (N/m ³)
M13-M12	-0.566	0.844	1000	9.772775863	8248.225
M12-M11	-0.943	0.587	1000	9.773613815	5738.759
M11-M10	-0.871	0.644	1000	9.774503990	6295.299
M10-M9	-0.351	0.939	1000	9.774851091	9178.681
M9-M8	-0.235	0.972	1000	9.775105934	9505.994
M8-M7	-0.154	0.988	1000	9.775301769	9659.888
M7-M6	-0.104	0.995	1000	9.775475620	9722.598
M6-M5	-0.122	0.993	1000	9.775831252	9703.670
M5-M4	-0.090	0.996	1000	9.776093105	9736.143
M4-M3	-0.097	0.995	1000	9.776360317	9730.247
M3-M2	-0.071	0.997	1000	9.776574385	9751.885
M2-M1	-0.063	0.998	1000	9.776796823	9757.355

Fuentes: Los autores

La fuerza calculada se muestra de manera inversamente proporcional a la pendiente, es decir en cuanto mayor pendiente menor fuerza del agua. Dicho comportamiento puede estar relacionado a los puntos definidos respecto a su altura, pues a mayor altura, menor gravedad. De este modo, la corriente intermitente presenta un valor promedio de fuerza del agua de 8919.062093 N/m³.

5. Discusión

En el volcán la Malinche no existe estado del arte respecto a algún análisis previo gravimétrico y fuerza del agua, sin embargo los resultados obtenidos muestran similitud con lo expuesto por [15], en el volcán Popocatepetl y los resultados gravimétricos en el bloque de Jalisco [3], obteniendo modelos semejantes en zonas volcánicas o de montaña.

6. Conclusiones

Dado el modelo IEGEN-6C4, el cual se ha considerado para este estudio como el campo real de gravedad, se ha logrado calcular las respectivas anomalías de gravedad, siendo las anomalías de aire libre la reducción de los valores del modelo al geoide en ausencia de masas, las cuales presentan valores positivos en todos los puntos calculados. Las respectivas anomalías de Bouguer muestran un modelo negativo ya que generalmente en zonas montañosas tienen

este comportamiento (dependiendo del tipo de roca). De este modo el presente trabajo, pretende contribuir con un análisis gravimétrico para determinar variaciones de densidad a nivel cortical, así como cambios de grosor en la corteza, no obstante, se requiere de un análisis más profundo para la determinación de posibles incrementos de aceleración de la gravedad lo cual puede propiciar escenarios como los flujos de lahar.

Finalmente, el cálculo de la fuerza del agua en la corriente intermitente de mayor pendiente, muestra que, a mayor pendiente menor fuerza del agua, siendo el factor contribuyente la gravedad, pues a mayor altura menor fuerza de gravedad, siendo el valor de la fuerza del agua de 8919.062093 N/m³.

Agradecimientos

Agradecemos al cuerpo académico: BUAP-CA-344-Ciencias de la Tierra Aplicada a la Prevención de Desastres de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por su colaboración en este proyecto.

Referencias

- [1] Angulo-Carrillo, J., Lermo-Samaniego, J.F., Martínez-González, J.A. y Valseca, R., La Malinche un volcán potencialmente activo. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica XIX, 2013.
- [2] Arias-Cáceres, J., Determinación de la anomalía de Bouguer para una zona de Canadá. Paper Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, November, 2015, 10 P. DOI: 10.13140/RG.2.1.5032.5840
- [3] Camacho, M. and Álvarez, R., Gravimetric analysis of the rifts and volcanic fields of the Jalisco block, Mexico. Tectonophysics, 791, art. 228577, 2020. DOI: 10.1016/j.tecto.2020.228577
- [4] Castro-Govea, R. and Siebe, C., Late Pleistocene-Holocene stratigraphy and radiocarbon dating of La Malinche volcano, Central Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 162(1-2), pp. 20-42, 2007. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2007.01.002
- [5] Dávila-Lamas, E.E., Análisis de peligro por lahares en el volcán La Malinche y delimitación de los depósitos secundarios en el sector sur. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, [en línea]. 2020, 100 P. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15898/Tesis.pdf?sequence=1>
- [6] Förste, C., Bruinsma, S., Abrikosov, O., Flechtner, F., Marty, J.C., Lemoine, J.M. and Biancale, R., EIGEN-6C4-The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 1949 of GFZ Postdam and GRGS Toulouse. Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-3707, EGU General Assembly 2014.
- [7] Hilda, Lic., Parque Nacional Malinche. Descripción Geográfica. [en línea]. 2020. Disponible en: <http://www.cge-tlaxcala.gob.mx/docs/malinche.pdf>
- [8] Hofmann-Wellenhof, B.H.M., Helmut Moritz Physical Geodesy. In Control Springer Wien New York, 2005.
- [9] Sinem-Ince, E. et al., (). ICGEM - 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services and future plans. Earth System Science Data Discussions, 2019, pp. 1-61. DOI: 10.5194/essd-2019-17
- [10] García-López, R.V., Notas de geodesia física, 2013.
- [11] Macías-Vázquez, J.L. y Capra-Pedol, L., Los volcanes y sus amenazas. La ciencia para todos, (210). 1^{ra} Ed. Fondo Cultural de Economía. México, 2005, 159 P.
- [12] Metrología MetAs, S.A., Intervalo de confirmación metrología. Boletín electrónico La Guía MetAs. [en línea]. 5, pp. 2-5, 2002. Disponible en: <http://www.metas.com.mx>
- [13] Montero-García, I.A., Matlalucueye. El volcán del alma Tlaxcalteca. [en línea]. 2020. Académia.Edu. Disponible en:

https://www.academia.edu/19566088/Matlalcueye_El_volcán_del_alma_tlaxcalteca

- [14] Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Soto-Cruz, B.S., y Alcántara-Iniesta, S., Análisis geoestadístico de las barrancas Colorada y Quimichule del volcán Popocatepetl (México) como aporte a la prevención de desastres naturales. *Investigaciones Geográficas*, (47), pp. 67-82, 2014. DOI: 10.5354/0719-5370.2014.32996
- [15] Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Vázquez-García, M. de la C., Martínez-Ortiz, A.G., Hernández-Andrade, D. y Benítez-Ramírez, D.M., Estudio cartográfico del volcán Popocatepetl, Puebla, México: volumen edificio volcánico, aceleración de la gravedad y zonas de riesgo para la población. *Contactos. Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, [en línea]. 115, pp. 38-52, 2020. Disponible en: <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/5>

R. Ramos-Aguilar, es Dr. en Ciencias de la Tierra y Oceánicas, profesor investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0001-5660-6608

P. Máximo-Romero, es MSc. en Ingeniería Estructural, profesora investigadora de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Básicas, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0002-2698-842X

V. Galindo-López, es Dr. en Ciencias, profesor investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0003-0112-2432

M. Ávila-Cruz, es MSc. en Ingeniería, profesor investigador de la Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0002-8024-2119

G. Yáñez-Pérez, es MSc. en Ingeniería, profesora investigadora, Facultad de Ingeniería, Ciencias Básicas, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0002-4529-5995

R. Márquez-Máximo, es Dr. en Ciencias, profesor del Bachillerato Internacional 5 de Mayo, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
ORCID: 0000-0002-7199-3404

D. Hernández-Andrade, es Estudiante del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, Puebla, México.
ORCID: 0000-0001-6544-4460

V. Covarrubias-Salvatori, es Doctor en Ciencias, director e investigador del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla, México.
ORCID: 0000-0001-5723-2601